

確率論的考察によるP L C装着2線に及ぼす 第3線の効果の評価

上 芳夫
(電気通信大学産学官連携センター)

3本線路系に2本線路用のPLC機器を接続するとき、接続しない線に電流が誘導される。これは隣接導体との結合現象で、電磁界的には電界結合と磁界結合、電気回路的には容量性結合と誘導性結合と呼ばれる現象であり、回路では相互キャパシタンス（容量）と相互インダクタンスで表現される。

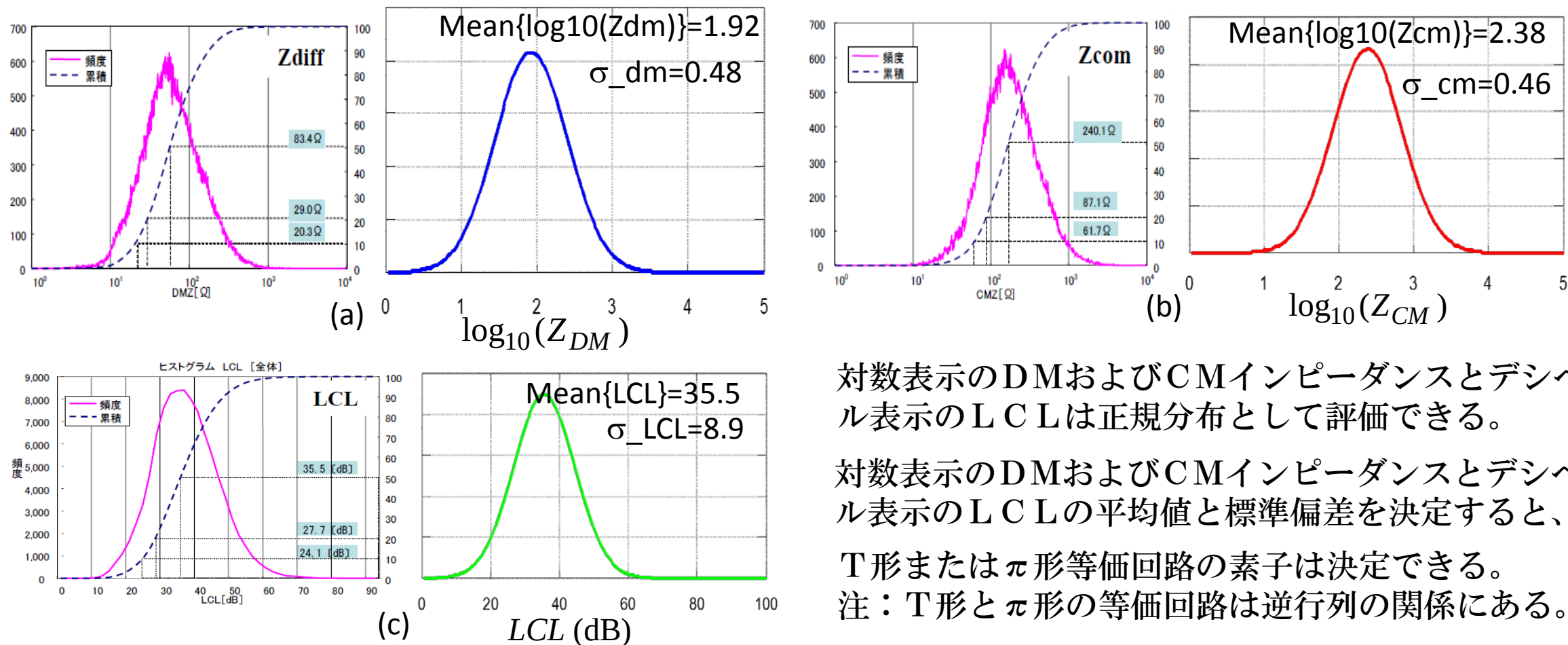
- 2線方式に用いるP L C機器を3線方式の電力線に用いるとき、伝送回路論的E M C問題は、
- (1) 2本線路自体は、平衡2本線路であると見なすことが出来ると、モード変換（ディファレンシャルモード（DM）からコモンモード（CM）への変換及びその逆変換）は殆どない。
 - (2) 3本線路系に2本線路用のP L C機器を接続するときは、**3本線路の2本を取り出し、平衡な状態でなくなると、線路自体でモード変換が発生している**ことである。

放射問題に寄与する大きな成分は、**線間隔が小さい場合**、2本線路系ではCM電流と呼ばれる成分であり、3本線路系ではCM電流に対応する成分は**同相成分**である。この同相成分が3本線路においてどの程度発生しているかが問題となる。

3相3線方式の電力線を使用する工場において、2線方式でのDMとCMインピーダンスおよびL C Lの実測が行われ、その結果が作業班に提出されている。ここでは、これらの**パラメータが独立であると仮定**して、提出された結果を基に変動する負荷回路をモンテカルロ法を用いて模擬回路を作成している。模擬した負荷回路をPLC通信が行われる電力線区間の外側に接続し、伝送線路理論を適用して、通信区間内の線路上に発生している信号および同相成分の**最大電流値、平均電流値を評価**する。なお、**伝送線路理論の適用は、線路系の断面寸法が波長に比べて十分に小さいことが条件**である。

確率論的（モンテカルロ法による）アプローチ

高速電力線搬送通信に関する研究会（平成17年度）報告書を参考に、2本線路系での実測値のDMとCMインピーダンスおよびLCLを確率分布から考える。ここでは、**パラメータが独立と仮定**する。



対数表示のDMおよびCMインピーダンスとデシベル表示のLCLは正規分布として評価できる。

対数表示のDMおよびCMインピーダンスとデシベル表示のLCLの平均値と標準偏差を決定すると、

T形または π 形等価回路の素子は決定できる。

注：T形と π 形の等価回路は逆行列の関係にある。

図1 2本線路系で測定されたモードインピーダンスとLCL及びそれらに対応する確率密度関数

2本線路系モデル

例として取り上げる線路系の寸法は、線径 3 mm、線間隔 5 mm、線路高 4 m(完全グラウンド面に対し同一高)とし、媒質は空気、系は無損失とする。

また、PLC機器は、第16回作業班の資料16-7にある送信電圧 0.1 V、内部インピーダンス 24 Ω 、受信インピーダンス 75 Ω とする。

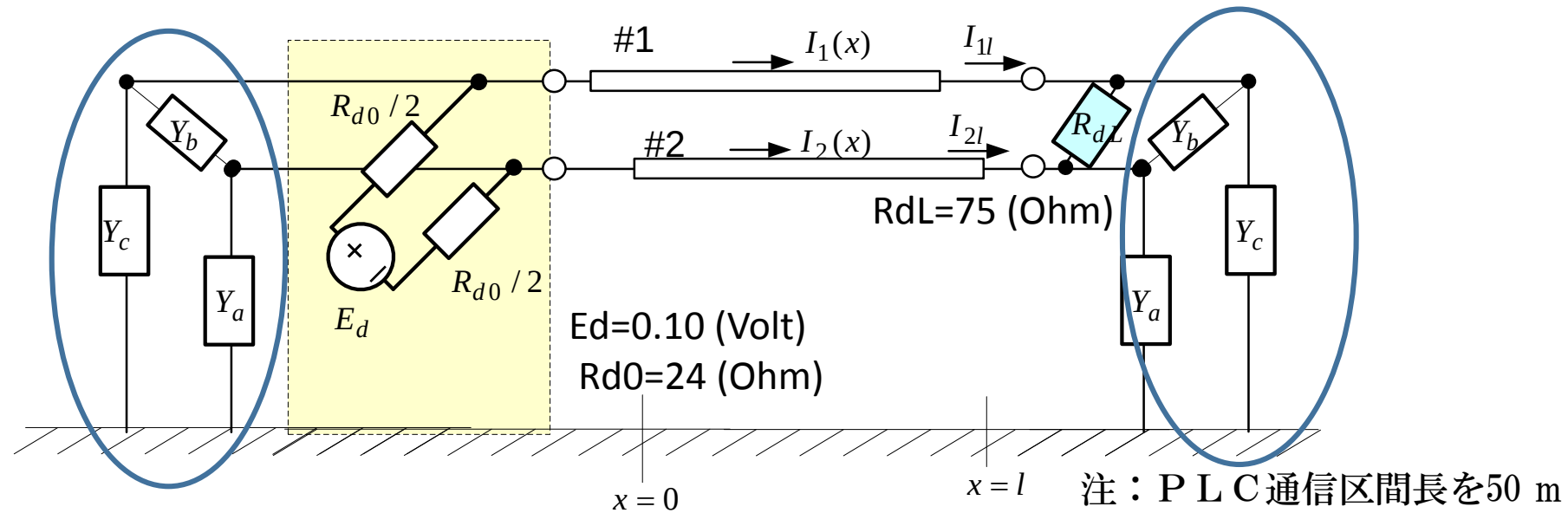


図2 2本線路系における伝送回路論的等価回路

PLC機器は、電力線の途中に挿入するとして、電気回路的表示を図2のようにする。この図において両端の π 形回路は、通信区間外の配線を見込んだ負荷回路であり、DMとCMおよびLCLから決定される回路素子を持つ等価な回路であるとしている。

素子値を変化させるときの現象

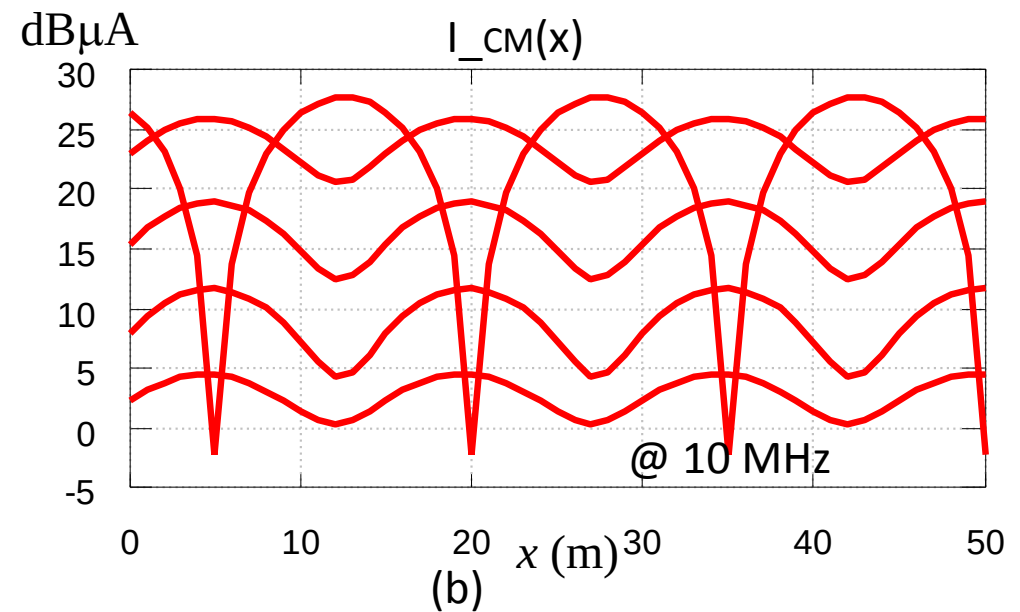
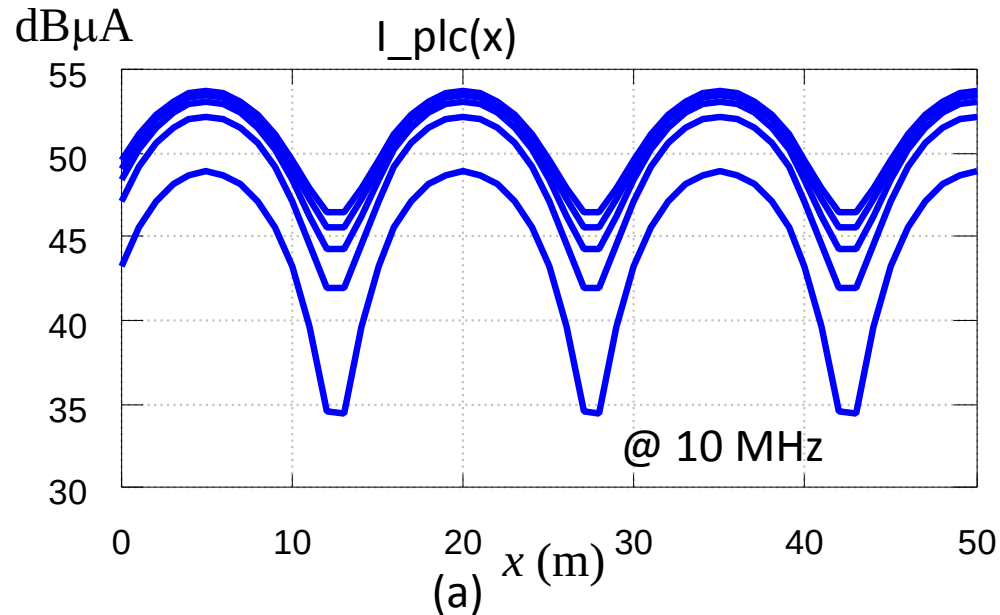


図3 2本線路系でのPLC信号電流(a)とCM電流(b)の線路上の電流特性の例（通信線路長50メートル）

負荷回路のインピーダンスをランダムに5回変化させたときの、PLCの信号電流 (I_{plc}) と線路上にモード変換されているCM電流 (I_{CM}) を、線路上で計算した結果である。

図3(a)から、それぞれの組合せでの**信号電流の最大値の変動は少なく**、ある値に制限されており、同図(b)からは、**CM電流の最大値（振幅値）は大きく変化している**。

線路上の電流の変化状況を評価するために、モンテカルロ法を用いて確率論的に取り扱う。

このために、前記の対数表示のDMおよびCMインピーダンスと、対数表示のLCLの平均値と標準偏差 σ を基に、 $\pm 3\sigma$ （あるいは $\pm 2\sigma$ ）の範囲で独立に発生させた乱数を用いて作成した5000組の負荷回路を用いて電流の評価を行う。**注：これらの設定はLCLが16 dB以上を意味するものではない（以下同じ）。**

± 3 σ の範囲での結果

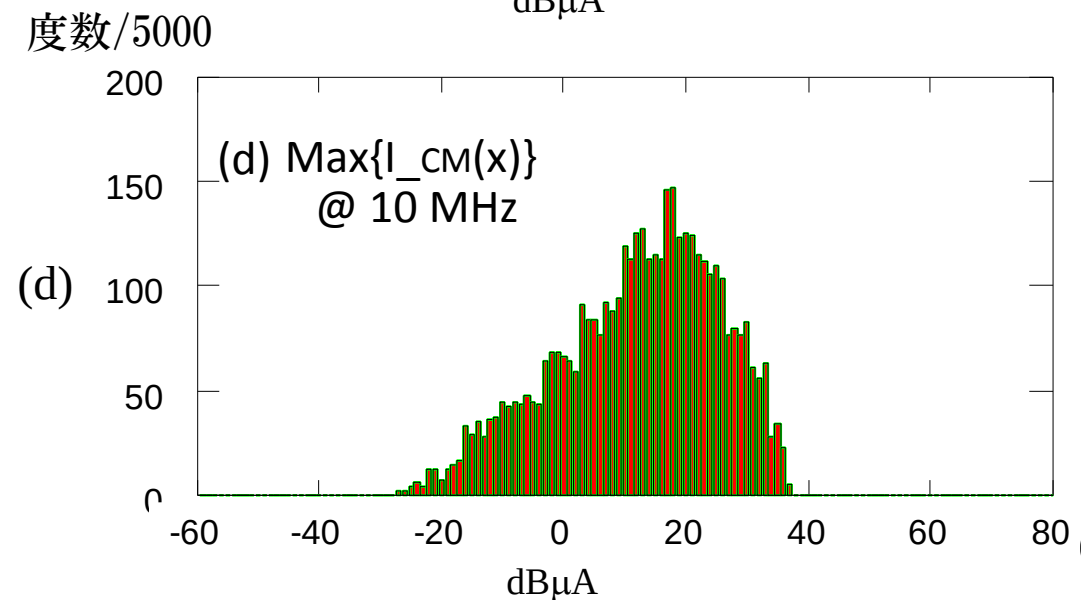
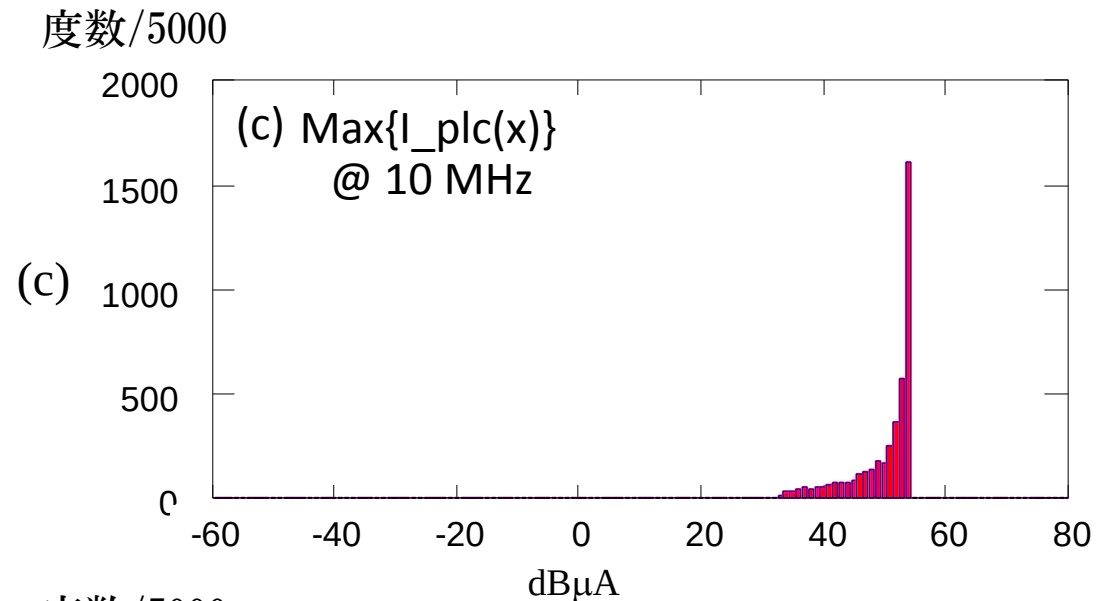
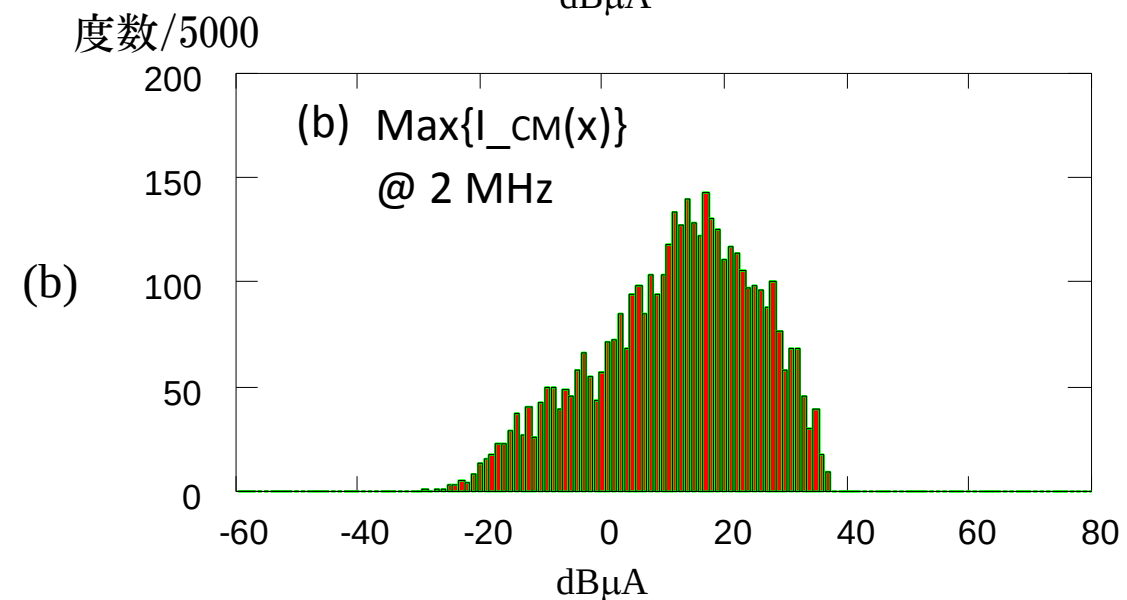
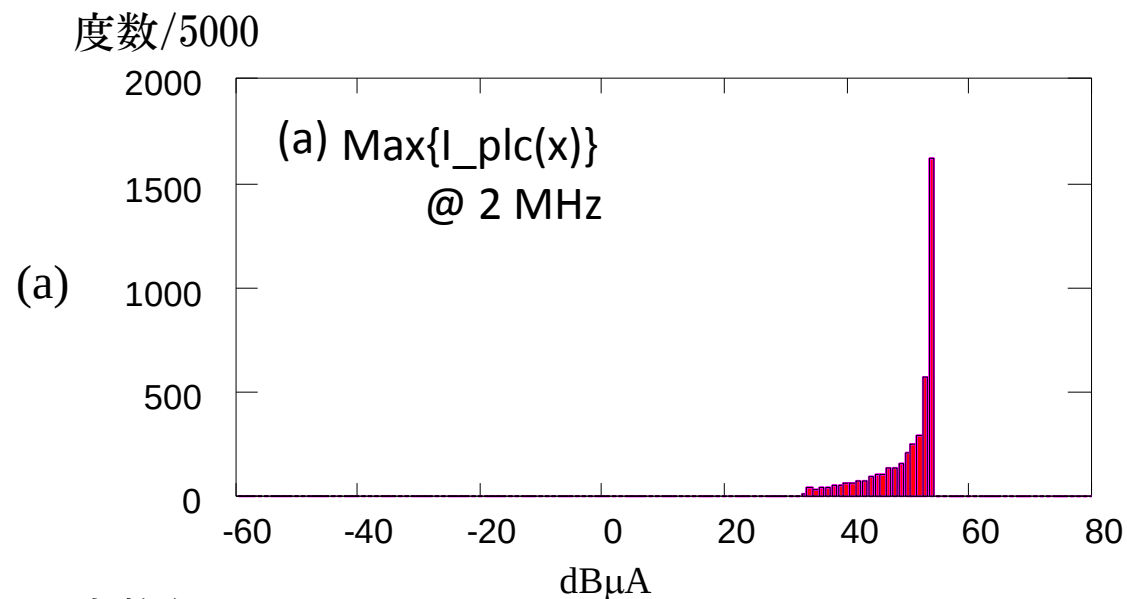


図4 2本線路（全長50メートル）上でのPLC信号電流（ I_{plc} ）とCM電流（ I_{CM} ）の最大値の頻度分布特性

± 2 σ の範囲での変化

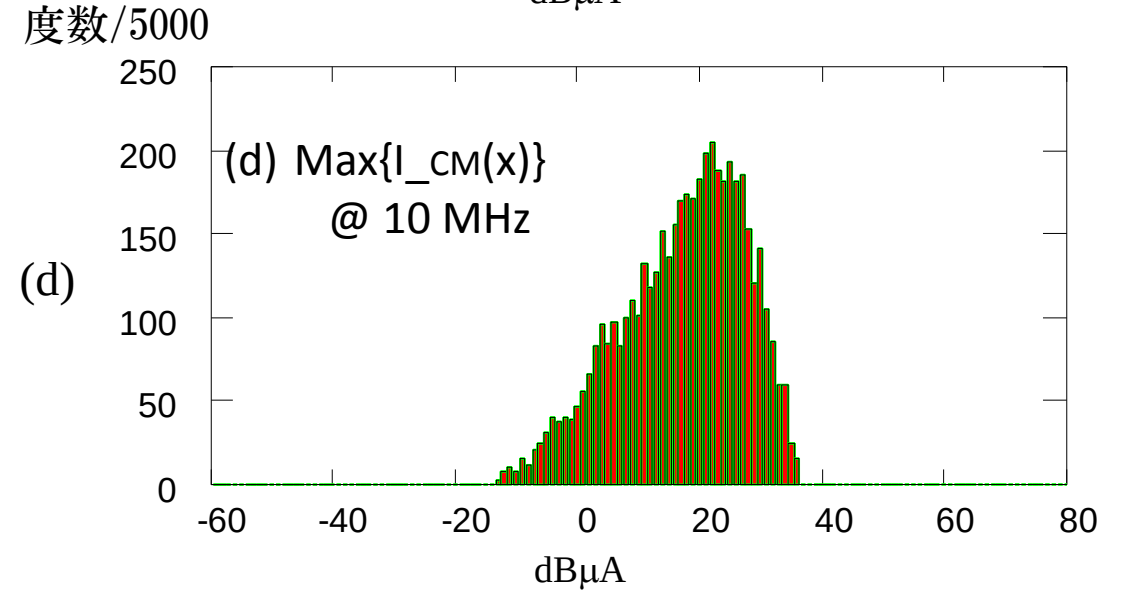
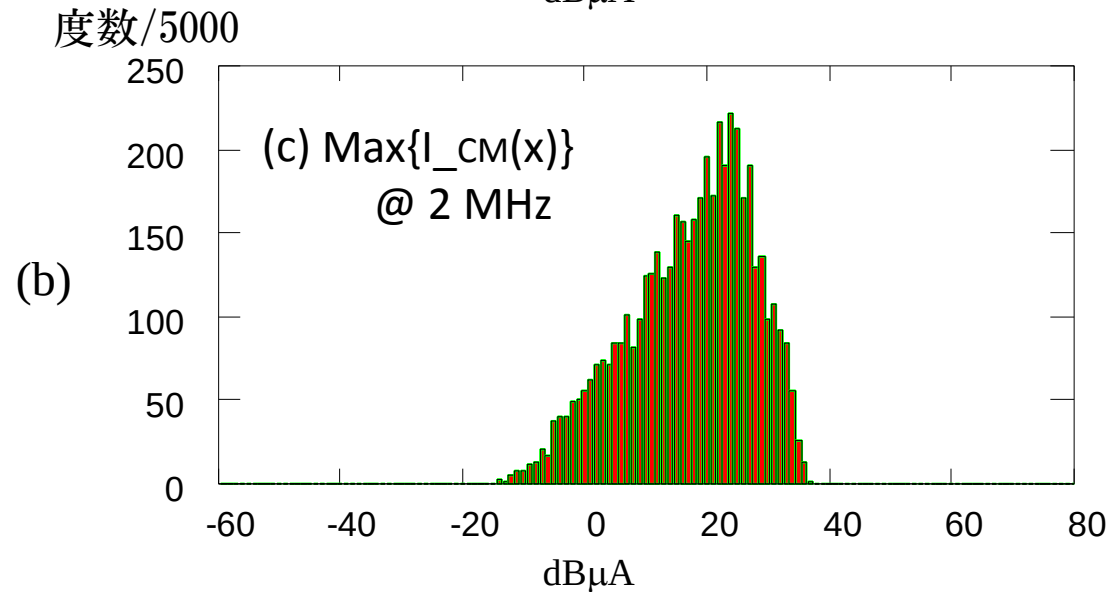
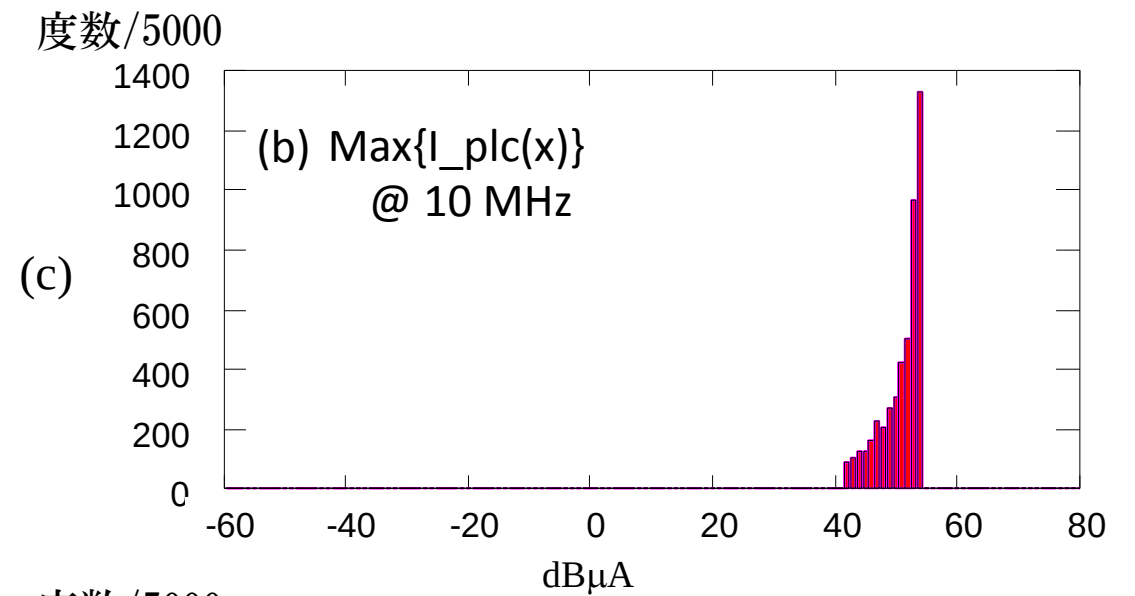
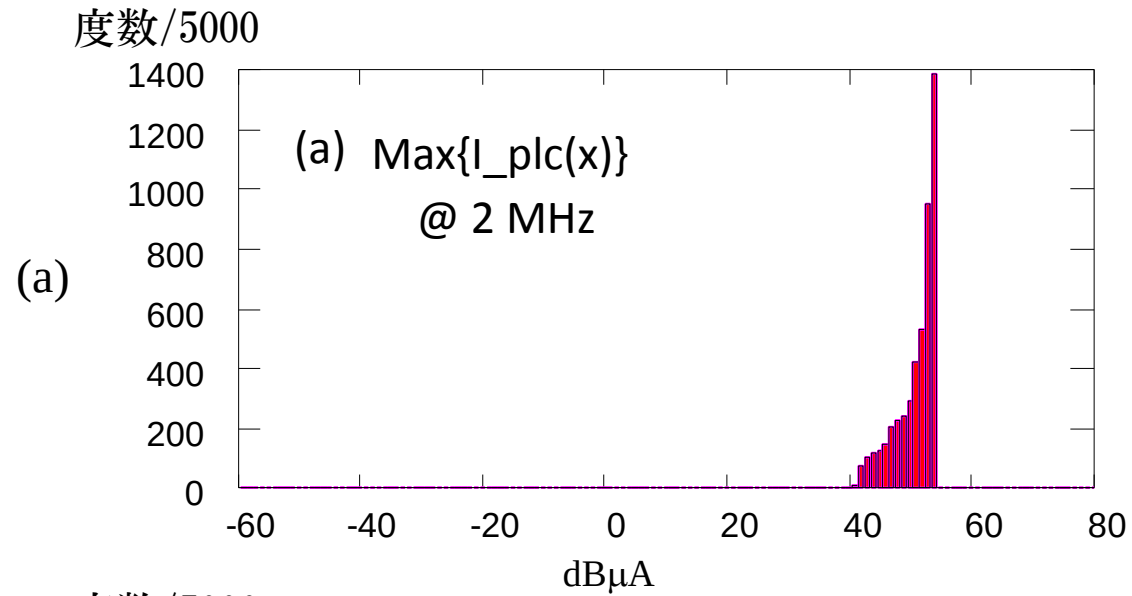


図5 2本線路（全長50メートル）上でのPLC信号電流（I_{plc}）とCM電流（I_{CM}）の最大値頻度分布特性

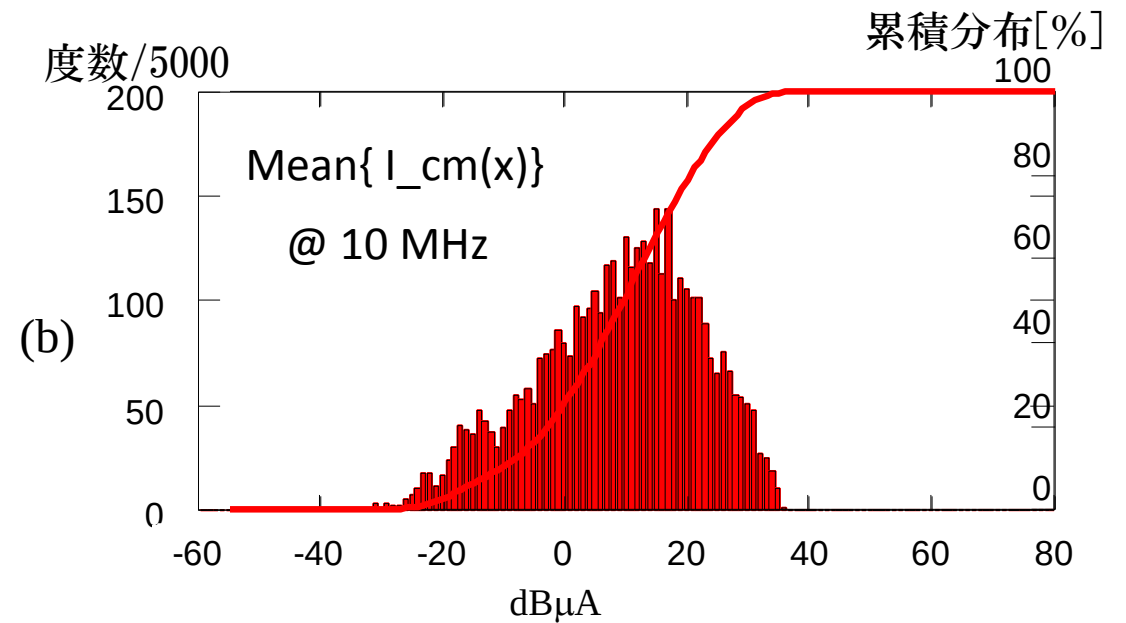
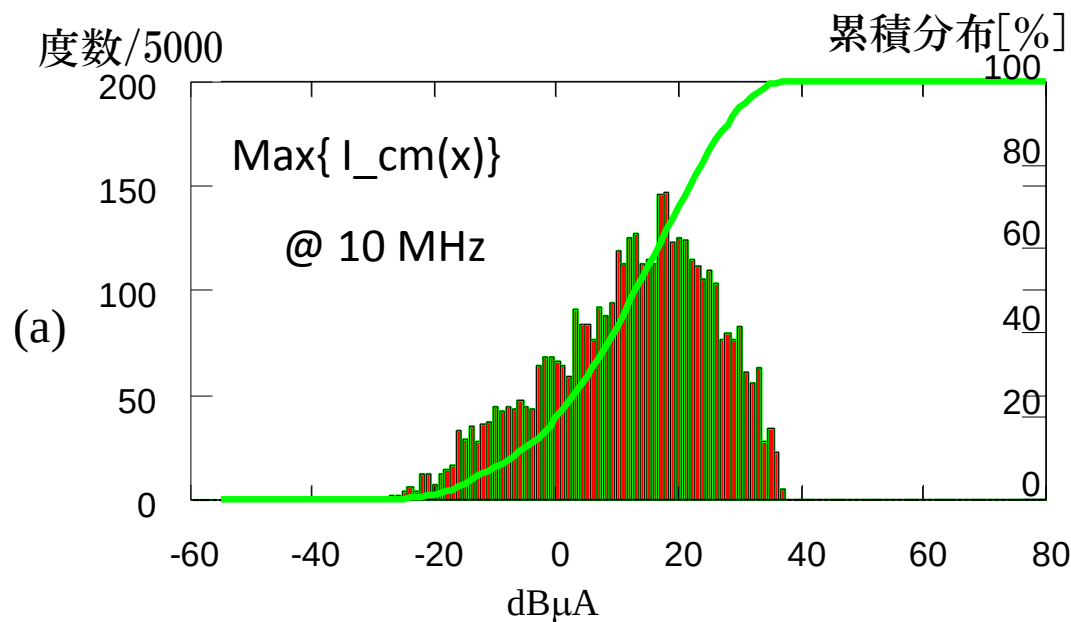


図6 2本線路（全長50メートル）上でのCM電流の最大値(a)と平均値(b)の頻度分布と累積分布特性

図4 および図5の頻度分布評価から、図3で推測したように次の結果が得られている。

1. PLCの信号電流(DM電流)の最大値は、ある上限値で抑えられ、その付近に集中し、広がり幅は小さい。
2. PLC信号電流に比べて、CM電流の最大値の頻度分布は大きく広がっている。
3. CM電流の最大値の頻度分布は、電流値が限りなく大きくなるのではなく、ある上限値以下に広がっている。
4. さらに、CM電流の平均値を評価すると、図6に示すように、CM電流最大値の頻度分布と同じような分布特性を示している。

3本線路系におけるモデル

3本線路系（線径 3 mm、線間隔 5 mm、線路高 4 mとし、媒質は空気で、無損失）に、P L C機器を接続するモデルを次図のようにする。ここで、3本線路系を見込む等価回路は図7の左右の端に付加された3ポートの π 形回路で表現している。この π 形回路は素子数が6個であるので、**2線方式でのDMとCMインピーダンスおよびLCLの3個だけでは厳密には決定できない。**

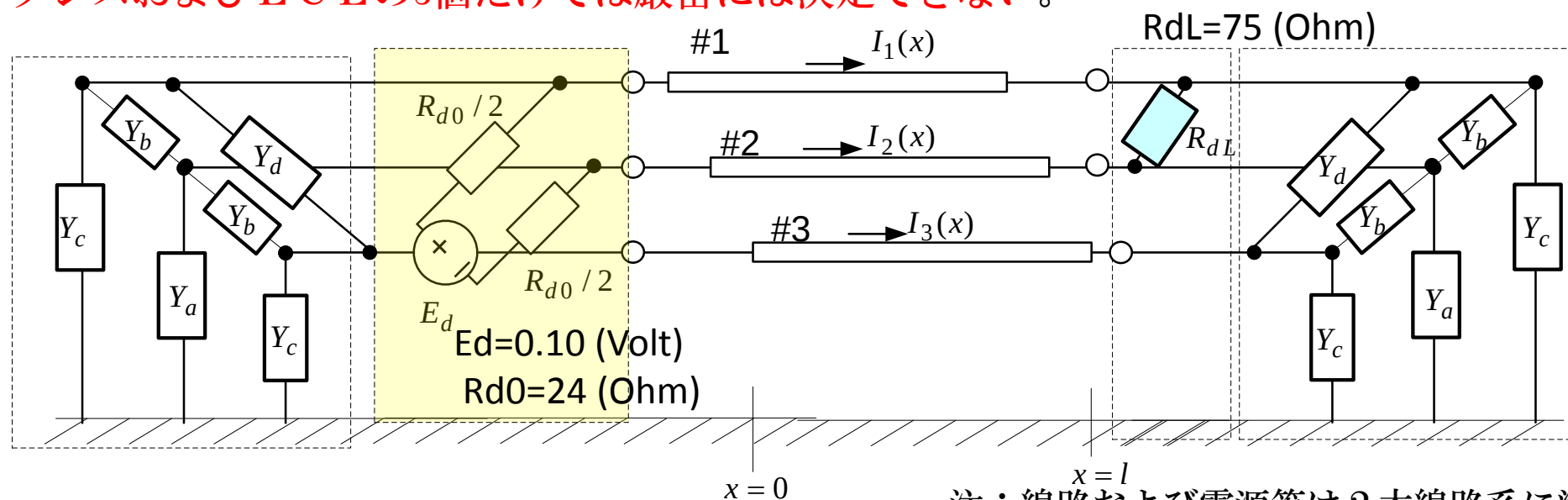


図7 3本線路系における回路論的等価回路

注：線路および電源等は2本線路系に準じる

図7の π 形回路の素子値は、高速電力線搬送通信設備作業班第15回作業班（平成30年10月11日）に提出された資料15-4の3本線路系を2本線路系として取り扱ったDMとCMインピーダンスおよびLCLの実測結果を参考にする（次ページ参照）。

ここでは、#1と#2線路端子の組あるいは#2と#3線路端子の組合せのときに最も平衡が崩れるとして、#2の線路端子に関して対称な負荷回路を構成するモデルとする。

資料 1 5-4 でのDMとCMインピーダンスおよびLCLの実測結果を確率論的に考察する。

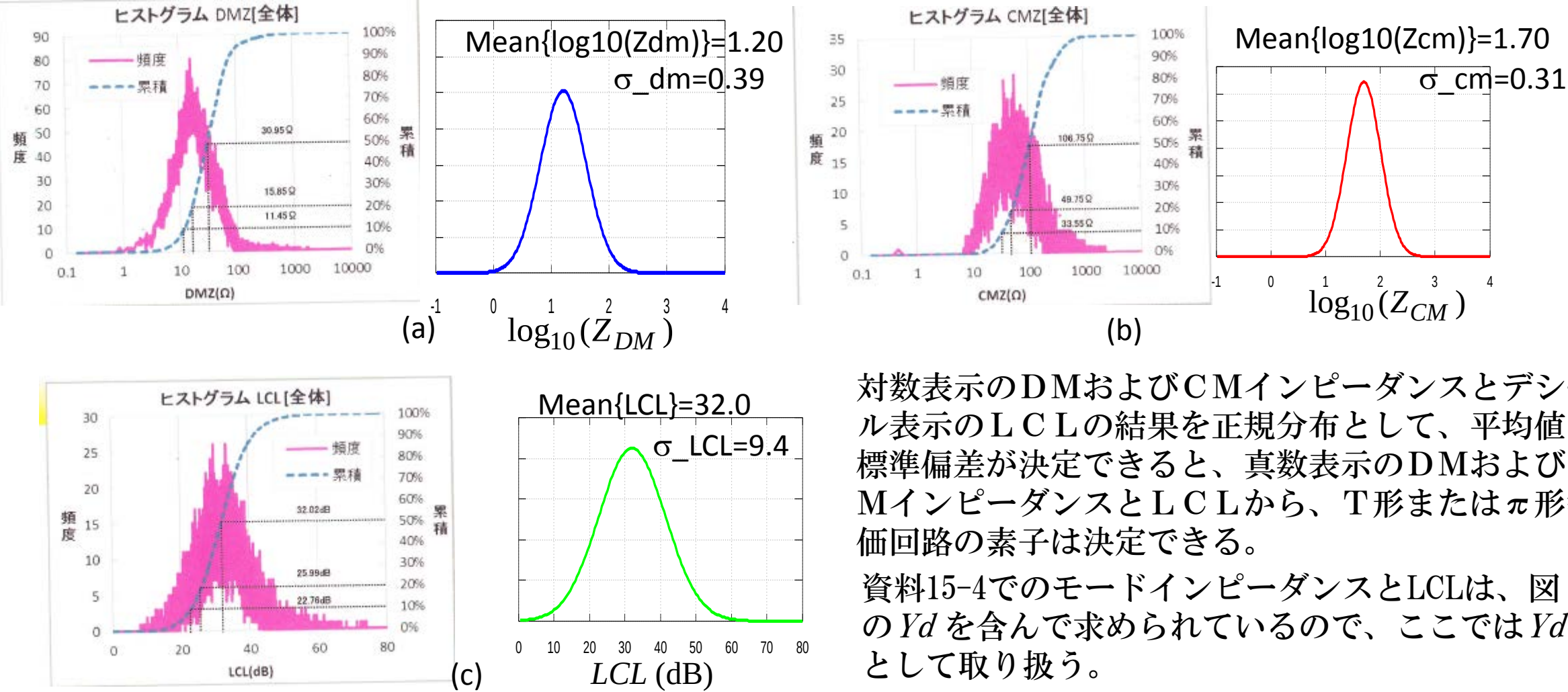


図8 3本線路系で測定されたモードインピーダンスとLCL及びそれらに対応する確率密度関数

対数表示のDMおよびCMインピーダンスとデシベル表示のLCLの結果を正規分布として、平均値と標準偏差が決定できると、真数表示のDMおよびCMインピーダンスとLCLから、T形または π 形等価回路の素子は決定できる。

資料15-4でのモードインピーダンスとLCLは、図7の Yd を含んで求められているので、ここでは $Yd=0$ として取り扱う。

各パラメータを $\pm 3 \sigma$ の範囲で変化させたときの線路上の電流を確率的に評価する。

± 3 σ の範囲

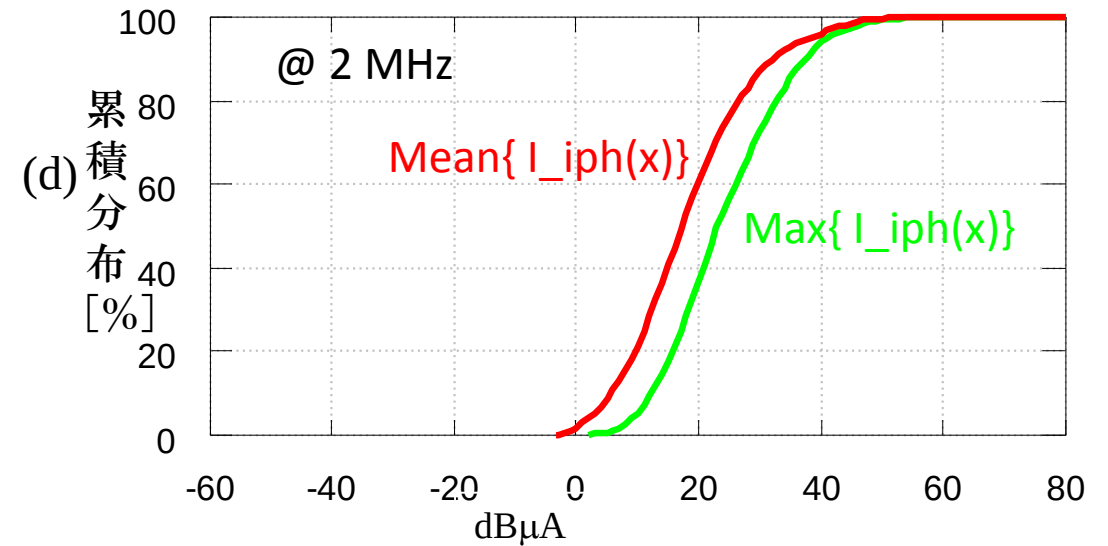
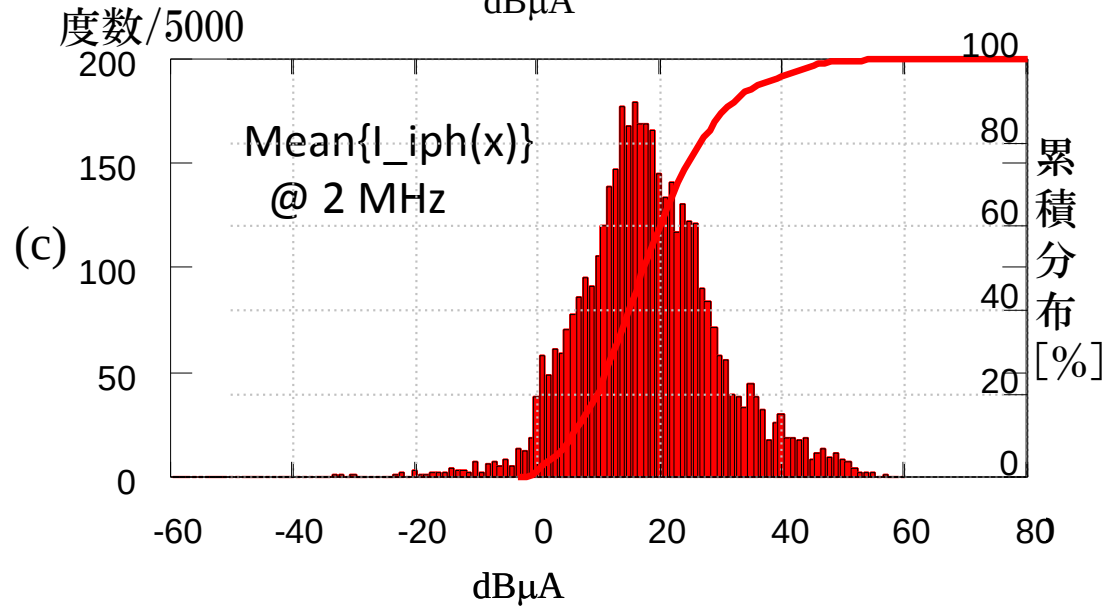
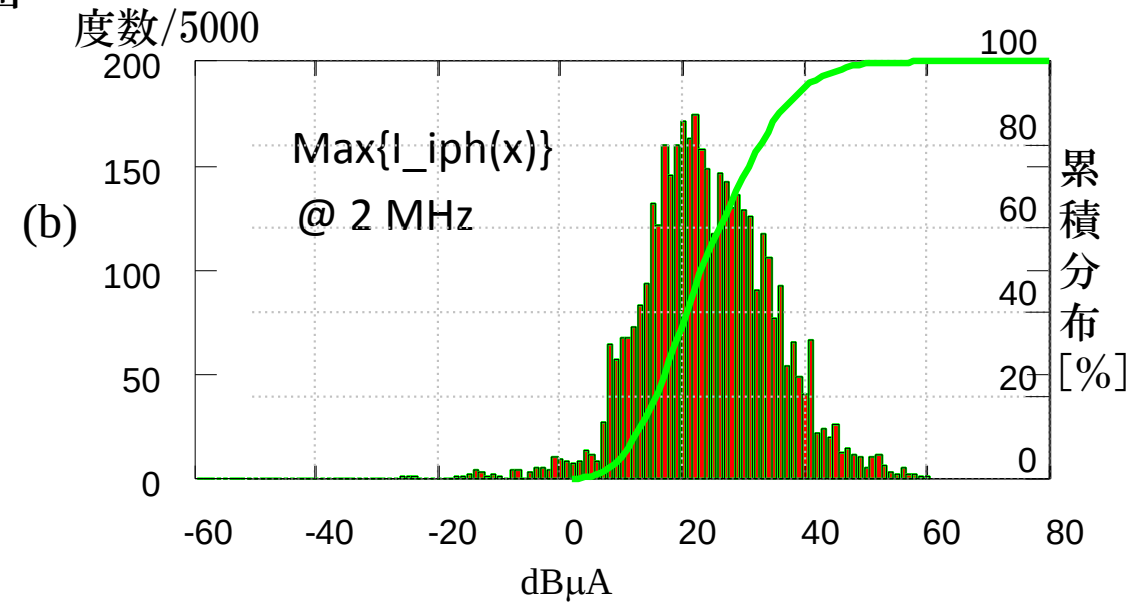
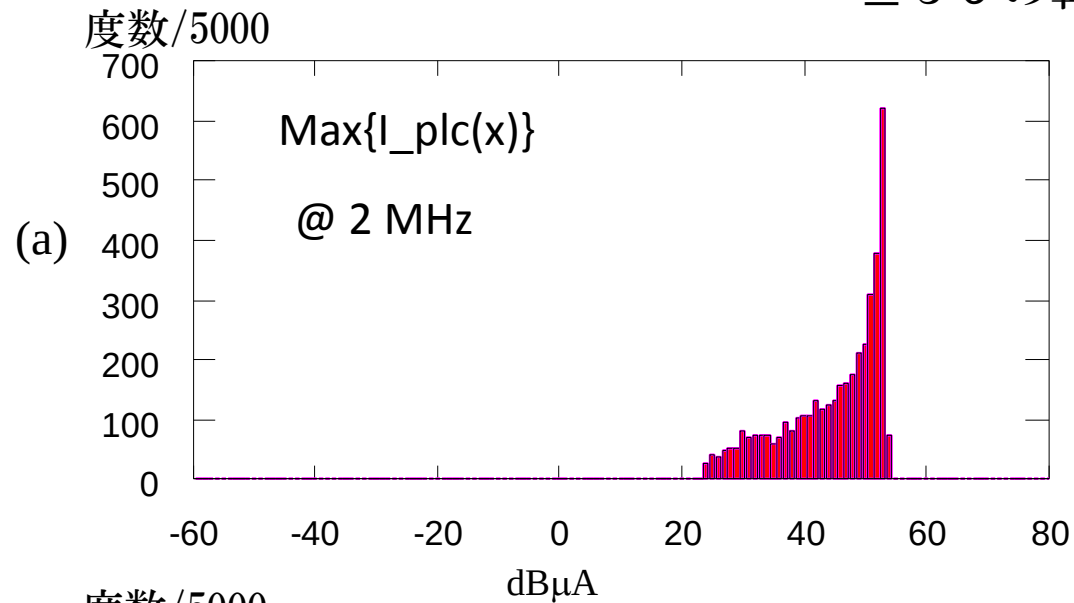


図 9 3 本線路(x=0~50 m)系でのPLC信号電流(I_{plc})と同相電流(I_{iph})の最大値と平均値の分布

± 3 σ の範囲

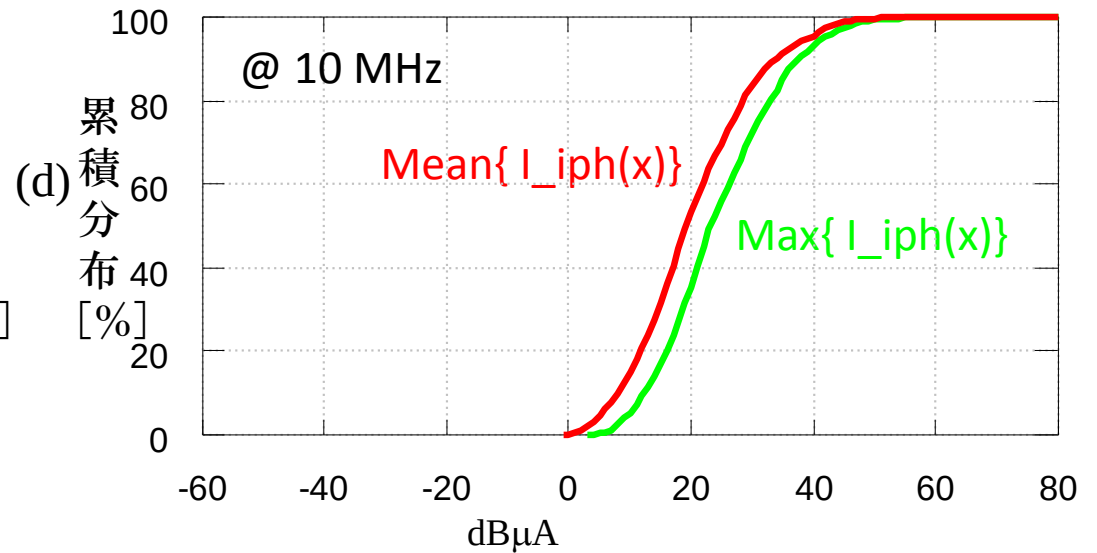
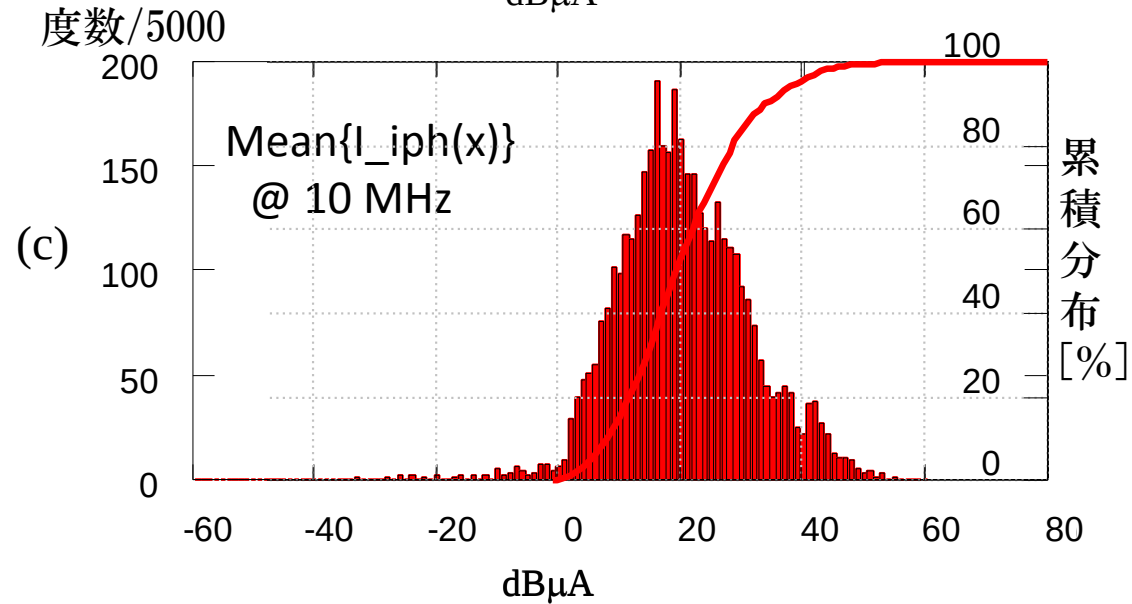
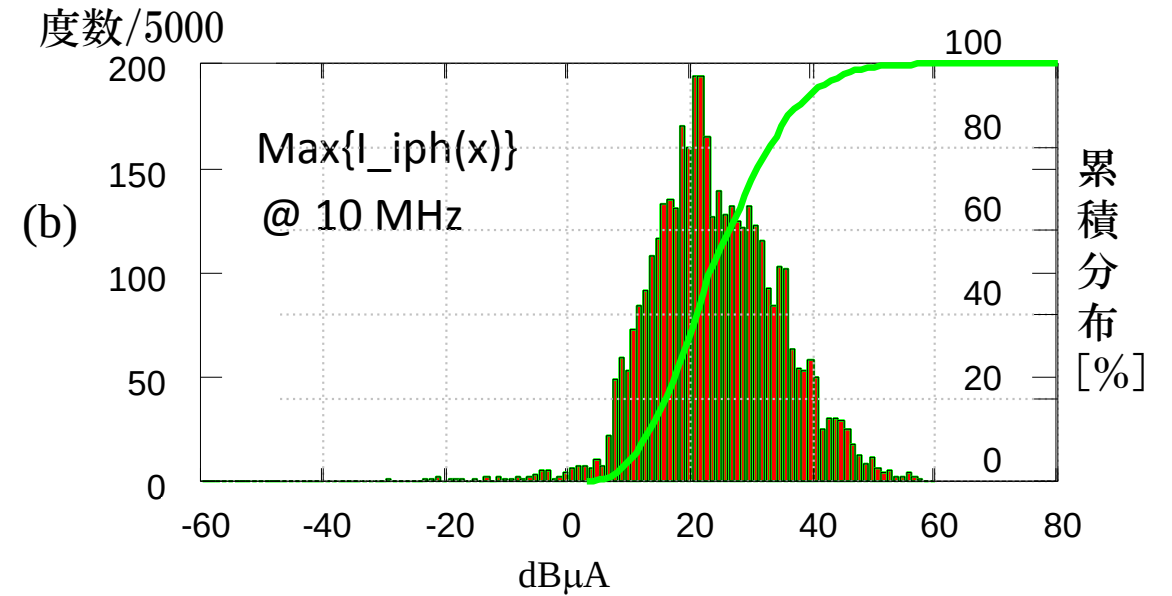
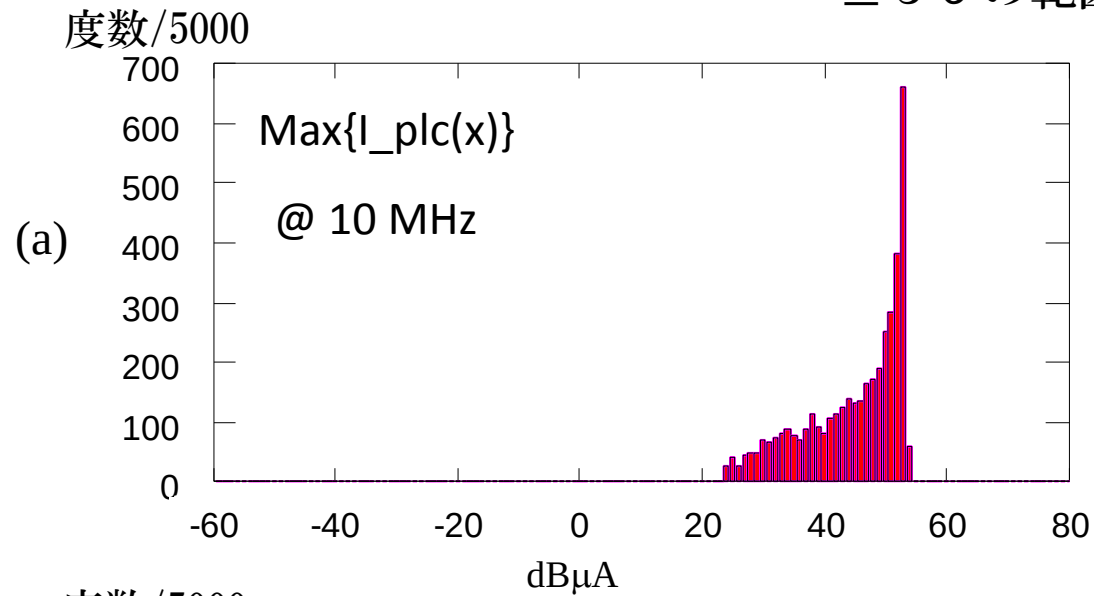


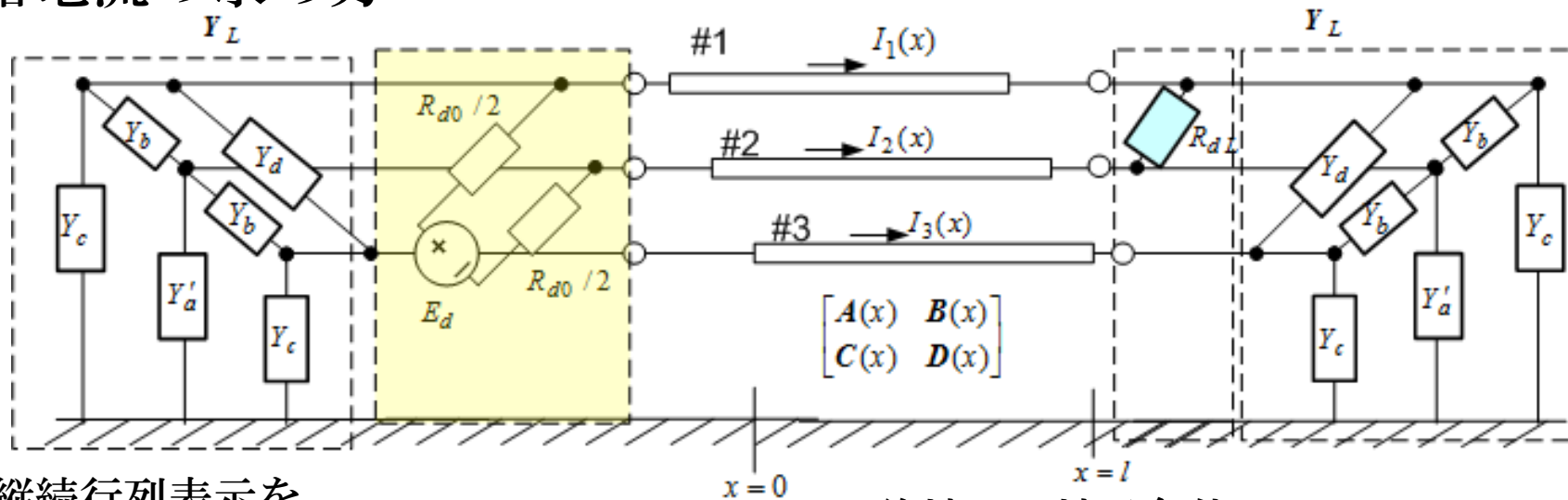
図10 3本線路(x=0~50 m)系でのPLC信号電流(I_{plc})と同相電流(I_{iph})の最大値と平均値の分布

3本線に2本線用のPLC通信機器を接続するときの放射妨害波に大きな働きをする同相電流について、図9、10から以下のような考察結果が得られる：

1. 2本線路系での場合と同様に、線路上のPLC信号電流 $\{I_{plc}(x)\}$ はある値以下である。
2. PLC信号電流は、その上限値付近に集中している。
3. 同相電流 $\{I_{iph}(x)\}$ 値は広範囲に存在する分布を示している。
4. ここで考察した周波数 2 MHzと 10 MHz(線路高 4 mは波長に対して小さいと見なせる範囲)において、最大同相電流値はほとんど同じような特性(性質)を示している。
5. 同相電流の最大値 $\max\{I_{iph}(x)\}$ と平均値 $\text{mean}\{I_{iph}(x)\}$ は、正規分布と見なせる頻度分布特性を示している。
6. 同相電流の最大値と平均値の累積分布から、50%累積値がそれぞれの平均値と見なせる特性である。図8、図9における頻度分布における平均値と標準偏差は、次表に示す値である。

周波数	Max $\{I_{iph}(x)\}$ [dB μ A]		Mean $\{I_{iph}(x)\}$ [dB μ A]	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
2 MHz	19.6	13.3	14.9	12.2
10 MHz	19.8	13.4	16.5	12.4

附録：線路電流の求め方



線路部分の縦続行列表示を

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(l) & \mathbf{B}(l) \\ \mathbf{C}(l) & \mathbf{D}(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(l) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

任意点と終端での電圧・電流ベクトルの関係は

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(x) \\ \mathbf{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(l-x) & \mathbf{B}(l-x) \\ \mathbf{C}(l-x) & \mathbf{D}(l-x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(l) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

始端での端子条件は

$$\begin{bmatrix} I_1(0) \\ I_2(0) \\ I_3(0) \end{bmatrix} = J_d \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} - \left\{ Y_{d0} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_L \right\} \begin{bmatrix} V_1(0) \\ V_2(0) \\ V_3(0) \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$J_d \equiv E_d / R_{d0} = G_{d0} E_d$$

終端での端子条件は

$$\begin{bmatrix} I_1(l) \\ I_2(l) \\ I_3(l) \end{bmatrix} = \left\{ Y_{dL} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_L \right\} \begin{bmatrix} V_1(l) \\ V_2(l) \\ V_3(l) \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

端子条件を一般化して次のように表現する

$$\mathbf{I}(0) = \mathbf{J}_d - \mathbf{Y}_{in} \mathbf{V}(0) \quad \mathbf{I}(l) = \mathbf{Y}_{out} \mathbf{V}(l) \quad (\text{A5})$$

(A1)式に代入して、両端子での電圧ベクトルは

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{U} & \mathbf{A}(l) + \mathbf{B}(l)\mathbf{Y}_{out} \\ \mathbf{Y}_{in} & \mathbf{C}(l) + \mathbf{D}(l)\mathbf{Y}_{out} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_d \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

(A2)式から、任意点電流ベクトルは(A6)式の結果を用いて

$$\mathbf{I}(x) = \{ \mathbf{C}(l-x) + \mathbf{D}(l-x)\mathbf{Y}_{out} \} \mathbf{V}(l) \quad (\text{A7})_{14}$$